

第V編 吊橋主ケーブルの腐食

1. はじめに

吊橋の主ケーブルの破損は、その殆どが腐食であり、これが原因となってケーブルの強度低下を引き起こす。腐食したワイヤは腐食部分における局所的な断面積減少のため、応力集中を生じ見かけ上脆性的に破断してしまう。腐食したケーブルを引張ると、腐食が激しく、強度低下の大きいワイヤの方から順次破断していき、ワイヤー本ずつの強度を加算した数値に見合うだけの強度をケーブルとして発揮できず、最悪の場合、落橋という事態も起こりうる。また、吊橋の斜めハンガーや斜張橋のケーブルは、一般に発生応力の振幅が大きく疲労破断の危険性がある。

建設後、20年から100年を経た海外の吊橋や斜張橋の中では、腐食によりケーブルの部分取り替え、あるいは全面取替えの事例が報告されている。国内では、1988年から本州四国連絡橋の既設吊橋の主ケーブルの内部調査がおこなわれ、素線の腐食が認められた。また、これらの調査結果から、従来の防食仕様では遮水が不十分であり、また防食仕様の改良試験も行われたが、主ケーブルの内部に水がある場合には、主ケーブルを防食することができないことが判明した。そこで、吊橋主ケーブルを完全に遮水することは困難であることから、主ケーブル内部の環境を改善させることが必要との結論に達し、検討を重ねた結果、ケーブル内に乾燥空気を送気、乾燥させることで防食する方法が新たに開発され、明石海峡大橋や来島大橋で採用された。また、瀬戸大橋等の既設の吊橋でも順次導入が図られている。

吊橋の主ケーブルは、吊橋の最も基本となる重要な部材であり、また架け替えが極めて困難であるため、橋を長期にわたり健全に維持していくためには、ケーブルの防食が極めて重要な問題となる。

本章は、国内、海外における吊橋ケーブルの腐食事例およびその補修方法についてまとめたものである。

2. 損傷の現状

(1) 国内の吊橋

主ケーブルの防食は、従来、図5-1に示すような素線の溶融亜鉛めっき+ペースト+ワイヤラッピング+塗装による遮水を目的とした仕様で行われていた。しかしながら、1989年に因島大橋（1983年供用）で主ケーブル内部の調査を行った結果、主ケーブル内部に水分が確認されるとともに、素線の腐食も発見された。また、他の吊橋（大鳴門橋、大島大橋、瀬戸大橋）についても主ケーブルの内部調査を行った結果、以下のことが確認された。

- ① 主ケーブル内部に水が存在している。
- ② 主ケーブルの側面から下面にかけて濡れが見られるが、上部は殆ど濡れていない。
- ③ ペーストが劣化し保水体化している。
- ④ 主ケーブル全長にわたり腐食が見られる。
- ⑤ 主ケーブルの内部も表層から数層程度まで赤錆となっている。
- ⑥ ケーブルバンド部は下方に白錆が発生している程度で、健全な状態にある。
- ⑦ 腐食は早期に始まっている。

また、東大橋の調査において、防食性の良いペーストでも、接触素線の防食のみで内部まで防食できていないことが確認された。

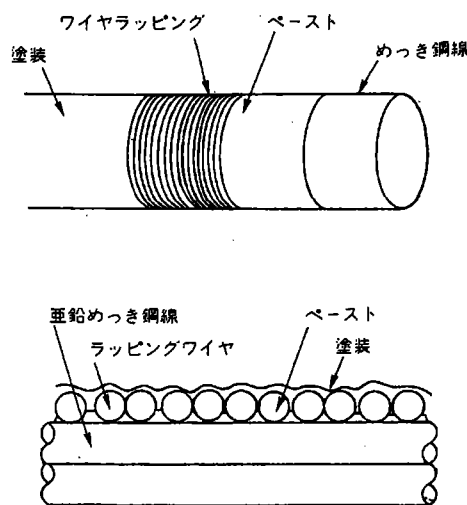


図5-1 ケーブル防食システムの概要(従来工法)

表5-1 国内吊橋における主ケーブルの防食仕様(1)

橋名	若戸大橋	関門橋	平戸大橋	東大雑橋	因島大橋	
完成年	1962年	1973年	1977年	1975年	1983年	
防食仕様	主ケーブル	亜鉛メッキ(スパイラルロープ)	亜鉛メッキ	亜鉛メッキ	亜鉛メッキ(300g/m ²)	
	ペースト	ジंकクロメート 亜麻仁油	高分子有機鉛系	高分子有機鉛系	ジंकクロメート 亜麻仁油	高分子有機鉛系 鉛酸カルシウム併用
	ワイヤラッピング	亜鉛メッキ鋼線 丸断面	亜鉛メッキ鋼線 丸断面	亜鉛メッキ鋼線 丸断面	亜鉛メッキ鋼線 丸断面	亜鉛メッキ鋼線 丸断面
	塗装	フタル酸樹脂系塗料	フタル酸樹脂系塗料	塩化ゴム系塗料	塩化ゴム系塗料	塩化ゴム系塗料
	送気システム	無し	無し	無し	無し	無し
概念図						
特徴	主ケーブルにスパイラルロープを使用。ペーストに、ジंकクロメート系を使用している。	ペーストに高分子有機鉛系を使用。塗装は、若戸大橋と同様フタル酸樹脂系。	ペーストは、関門橋と同様有機鉛系を使用。塗装系が関門橋と異なる。	ペーストは、若戸大橋と同様ジंकクロメート系を使用。塗装系が若戸大橋と異なる。	送気システムを追加。	

表5-2 国内吊橋における主ケーブルの防食仕様(2)

橋名	*瀬戸大橋	レインボーブリッジ	明石海峡大橋	白鳥大橋	来島海峡大橋	
完成年	1988年	1993年	1998年	1998年	1999年	
防食仕様	主ケーブル	亜鉛メッキ(300g/m ²)	亜鉛メッキ(300g/m ²)	亜鉛メッキ(300g/m ²)	亜鉛メッキ(300g/m ²)	
	ペースト	高分子有機鉛系 鉛酸カルシウム併用	リン酸アルミニウム系	なし	リン酸アルミニウム系	なし
	ワイヤラッピング	亜鉛メッキ鋼線 丸断面	亜鉛メッキ鋼線 丸断面	亜鉛メッキ鋼線 丸断面 +ネオプレンゴム巻き	亜鉛メッキ鋼線 S断面	亜鉛メッキ鋼線 S断面
	塗装	IPネオ樹脂系(下塗り) ポリウレタン樹脂系(中・上塗り)	クロロレン系ゴム塗料	クロロレン系ゴム塗料	柔軟型 IPネオ/フッ素樹脂系	柔軟型 IPネオ/フッ素樹脂系
	送気システム	無し	無し	有り	無し	有り
概念図	<p>ワイヤラッピング、ペースト、めっき鋼線、亜鉛めっき鋼線、ラッピングワイヤ、塗装</p>		<p>塗装(3層)、ネオプレンシート(1.8mm)、液体ネオプレン、接着剤(塩化ゴム系)、ラッピングワイヤ、ケーブルワイヤ</p>	<p>Sラッピングワイヤ、リン酸アルミニウムペースト、柔軟性を付与したフッ素防食塗料、ラッピングワイヤ、主ケーブル芯線(亜鉛メッキ鋼線)</p>	<p>S字形ラッピングワイヤ、塗装、ラッピングワイヤ、主ケーブル芯線(亜鉛めっき鋼線)</p>	
特徴	従来型防食工法。送気システムを追加。	ペーストには防食性を向上させた、リン酸アルミニウム系を採用。塗装は、ケーブルの伸縮に追従性のあるクロロレン系ゴム塗料を採用。	ケーブルの気密性、遮水性を向上させるために、ワイヤラッピングにゴムラッピングを追加。乾燥空気をケーブル内に送り込みケーブル内部の環境を改善する「送気乾燥システム」を導入。ペーストはケーブル内の通気性向上を図るため省略した。	ワイヤラッピングを丸断面より遮水性の良いS字型とした。ラッピングワイヤの動きに対して追従性のある塗装系を採用。送気システムを追加予定。	同左。乾燥空気をケーブル内に送り込みケーブル内部の環境を改善する「送気乾燥システム」を導入。ペーストはケーブル内の通気性向上を図るため省略した。	

* 瀬戸大橋は、下津井瀬戸大橋、南備瀬戸大橋、北備瀬戸大橋を指す。

(2) 海外の吊橋

建設後 20 年から 100 年を経た海外の吊橋についても、主ケーブルの腐食が見られるが、供用後 50 年以上経過した吊橋においても赤錆の発生は、主ケーブル最外層のワイヤーから数層程度であり、全般的な亜鉛メッキワイヤーの状態は、良好であった。

表5-3 に海外の吊橋における防食仕様を示すが、100 年を経たブルックリン橋から余り変化は見られず、亜鉛メッキワイヤーに一次処理（あまに油）を施し、ペーストには鉛丹系を採用している。また、ラッピングシステムは、軟鋼の亜鉛メッキワイヤーを用いており、その上に塗装を行っているのが標準的な防食仕様である。

表5-4 は 1990 年度に主ケーブルの内部検査がなされた結果である。ケーブル腐食現象としては、一般的に以下のようなものである。

- ① 腐食部位として、水の滞水しやすい中央径間中央部、特にケーブル下面での腐食の進行が、他の部位に比べ顕著である。
- ② ケーブルバンドと一般部では、バンド部の腐食が激しい。
- ③ ケーブル内から水の流出が認められる。
- ④ 局所的に主ケーブルのラッピングが損傷している付近では、腐食の進行が著しい。

表5-3 海外吊橋における主ケーブルの防食仕様(1)

橋名	ブルックリン橋	ウィリアムズバーグ橋	ペアーマウンテン橋	マウント・ホープ橋	ミッドハドソン橋
架橋地	米国 ニューヨーク州ニューヨーク	米国 ニューヨーク州ニューヨーク	米国 ニューヨーク州ビークスビル	米国 ロードアイランド州プリスト	米国 ニューヨーク州ウケープジー
完成年	1883年	1903年	1924年	1929年	1930年
防食仕様	主ケーブル	亜鉛メッキ	亜麻仁油、防錆油でワイヤを保護 (亜鉛メッキなし)	亜鉛メッキ	亜鉛メッキ
	ペースト	鉛丹	鉛丹	鉛丹	鉛丹
	ワイヤラッピング	亜鉛メッキ鋼線	建設当初は、「耐久性金属被覆」と呼ばれる線スックの上に鉄の薄板(厚さ約1.6mm)を設置。後に亜鉛メッキワイヤで再ラッピング。	亜鉛メッキ鋼線	亜鉛メッキ鋼線
	塗装	仕様不明	仕様不明	仕様不明	仕様不明
腐食状況	1980年代初頭に主ケーブル内部調査を実施。照査の結果、主ケーブルワイヤーの3層目より中は、亜鉛メッキも含め良好との報告。	1915年~1922年および1980年に主ケーブルの内部調査を実施。1912年に中央径間部でケーブル内の腐食が発見され、1915年~ワイヤラッピングを実施。1980年ケーブル全径間で孔食有り。特にケーブル下面が激しい。	1990年に主ケーブルの内部調査を実施。最外縁ワイヤーの3層に局所的な均一腐食あるいは孔食有り。ケーブル最外層より4cmから5cmまで亜鉛メッキの劣化が認められる。径間中央部、主ケーブル下側での腐食の進行が顕著である。	1960年、1988年に主ケーブルの内部調査を実施。1960年の調査では、中央径間でかなりの長さにより含水、腐食が認められる。部分的にワイヤの取り替えを実施。1988年の調査では、まだ水の滞留有り。主ケーブル底部3~4層に腐食が見られる。	1968年、1990年に主ケーブルの内部調査を実施。1968年の調査では、外面から7cmの間で孔食、腐食、水の存在有り。1990年の調査では、ケーブル最外層より7cmから10cmに局所的な均一腐食あるいは孔食が見られる。主ケーブル下面の腐食の進行が顕著である。多数のワイヤが切断。ワイヤの破断位置に規則性はないが、局所的なラッピングの損傷箇所と対応しており、腐食疲労が応力腐食割れによる粒内割れと推定される。

表5-4 海外吊橋における主ケーブルの防食仕様(2)

橋名	トロイボロー橋	ゴールデンゲート橋	ブロンクスホワイトストーン橋	ニューポート橋	第2チェサピーク・ベイ橋
架橋地	米国 ニューヨーク州ニューヨーク	米国 カリフォルニア州サンフランシスコ	米国 ニューヨーク州ニューヨーク	米国 ロードアイランド州	米国 マリランド州アナポリス
完成年	1936年	1937年	1939年	1968年	1973年
防食仕様	主ケーブル	亜鉛メッキ		亜鉛メッキ	亜鉛メッキ
	ペースト	鉛丹	鉛丹	鉛丹	不明
	ワイヤラッピング	亜鉛メッキ鋼線	亜鉛メッキ鋼線	亜鉛メッキ鋼線	ラッピングワイヤ無し。 ファイバーグラス・アクリル素材によるラッピングシステムを採用。
	塗装	仕様不明	仕様不明	仕様不明	ハイバロン塗料
腐食状況	1990年に主ケーブル内部調査を実施。最外縁ワイヤの3～4層に局所的な均一腐食あるいは孔食有り。ケーブル最外層より10cmまで亜鉛メッキが劣化。	1990年に主ケーブル内部調査を実施。最外縁ワイヤの3～4層に局所的な均一腐食あるいは孔食有り。ケーブル最外層より14cmまで亜鉛メッキが劣化。ケーブルより水の流出が見られた。	1990年に主ケーブル内部調査を実施。最外縁ワイヤから14cmに局所的な均一腐食あるいは孔食有り。ケーブル最外層より18cmまで亜鉛メッキが劣化。局所的にラッピングが損傷している塔付近での腐食の進行が著しい。	ケーブル内部調査が実施されていないため不明。	ケーブル内部調査が実施されていないため不明。

3. 損傷原因の究明

吊橋主ケーブルの腐食は、工事中に残存した水、あるいは供用後塗膜の割れ等何らかの原因により侵入した水が、主ケーブル内で日中、外気温の上昇により水が蒸気化し、夜間の気温の低下により結露する状態が繰り返され湿り気状態が発生したと推定される。

乾湿を繰り返す部位は、常に水に覆われた部位より腐食速度が速くなる。これは、乾湿を繰り返す部位が、常に水に覆われた部位と比べ水の層が薄く、腐食因子の一つである酸素の供給が限定されるためであり、また、局部的な腐食電池を形成して局部腐食が進行するためだと考えられる。亜鉛メッキ鋼線が湿り気に弱いことは、湿ったガーゼを亜鉛メッキ鋼線に巻きつけた試験において、早期に腐食が発生したことにより確認されている。

また、亜鉛メッキ鋼線は大気中での相対湿度が 60%以下ではほとんど腐食しないことが知られているが、温度や海塩粒子および亜硫酸ガス等の大気汚染物質、そして亜鉛メッキ鋼線表面の付着物（さび、ペースト等）がある場合には腐食速度に影響を及ぼすものと考えられる。

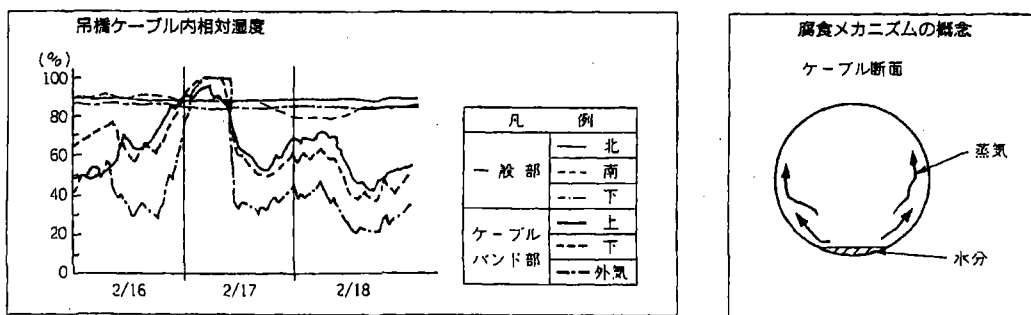


図5-2 腐食のメカニズム

4. 対策工法

(1) 国内のケーブル

吊橋主ケーブルの防食は、従来二重のシステムで行っていた。第一は径5mm程度の素線を垂鉛めっきすることである。第二は素線を束ねたケーブル外周にペーストを塗り、丸ワイヤ(被覆材)で巻き、その上に塗装を施し、外部からの水を遮断しようとするものである。

このシステムで十分な防食効果が得られなかった要因を明らかにする目的で、各種ペーストの特性試験、模擬ケーブルによる促進試験や暴露試験が行われた。その結果、以下のことが分かった。

- ・ケーブル内に水分がないと素線は腐食しない。
- ・水分があるとペーストの性能には関係なく内部に腐食が発生する。

ケーブルを覆って長期にわたって完全に遮水することは現実的には不可能である。そこでケーブル内に乾燥空気を送り込み、乾燥させる方向で検討が進められた。

図5-3にケーブル内の送気システムを示す。これは補鋼桁上に設置した送気設備で空気乾燥させ、その乾燥空気を塔柱内部およびケーブル上の配管を通して径間のほぼ中央部に設けた送気バンドまで送気を流入させるものである。約半年間の追跡調査の結果、送気バンドより230mが十分乾燥し、250m以上の位置においても乾燥が進む傾向を得ている。

送気乾燥システムにおいては、ケーブルを長期間気密化することも重要な課題である。特に、弱点部と考えられるバンド部のシールについては、実橋での送気試験においても漏洩が確認されており、今までのような雨水侵入防止だけでなく、内圧に対しても有効な材料を選定する必要がある。平成7年度に、机上検討および伸びを考慮した圧力試験を行い、下層にブチルゴム、表層に変性シリコンを行うことで気密性、耐圧性および耐久性を確保することとした。また、実橋送気試験にて確認されたバンド部天端ハンガーロープからの漏洩についてもハンガー下にブチルゴムを入れ、対応することとした。

海上部で行われるこの送気システムにおいては、塩分を除去しないとケーブル内に塩分を送り込み、長年にわたって蓄積させる可能性もある。

試験にて相対湿度60%以下では、ほとんど腐食しないことを確認したが、自然条件での長期試験結果ではなく、万全であるとはいいがたい。そこで、ケーブル内に塩分を極力流入させない対策も併せて行うこととした。

計画している除塩フィルターは、0.3 μ m以上の粒子(海塩粒子は概ね0.50~30 μ m)を99.97%除去する能力を有するものであり、実橋の使用状態での性能確認試験を開始している。

吊橋の場合のケーブルの防食対策は、上記に述べたような乾燥空気の送気による方法が採用され始めているが、その他のケーブル系橋梁では表-5に示すようなケーブルの防食方法もある。

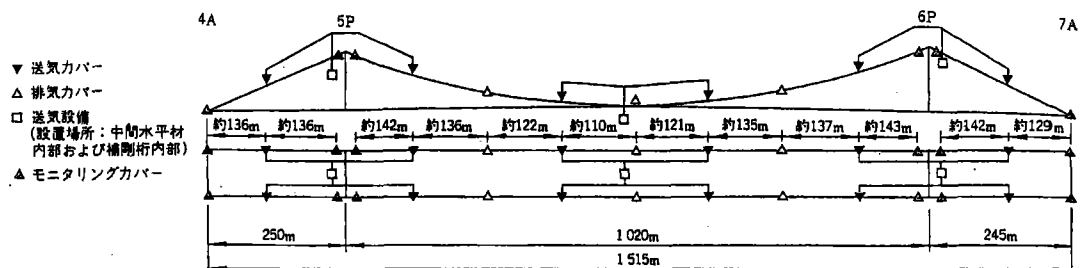
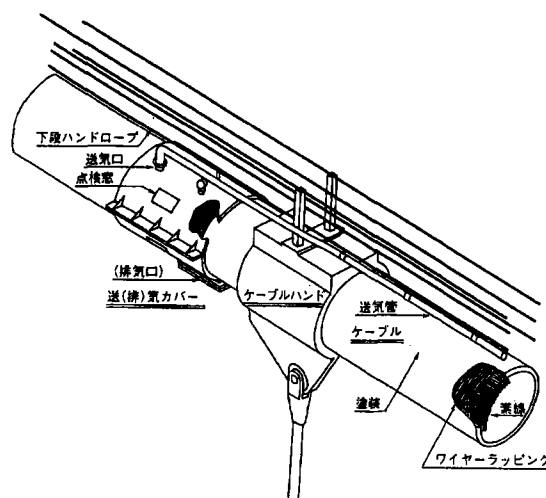


図-2 配管ルート (来島第2大橋)

配管ルート (来島第2大橋)



送(排)気カバー

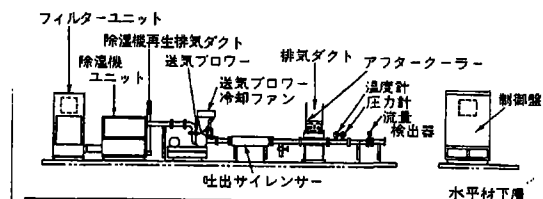


図-3 送気設備 (6P 中間水平材内)

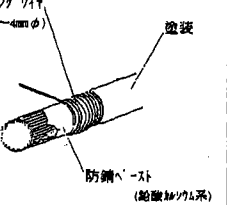
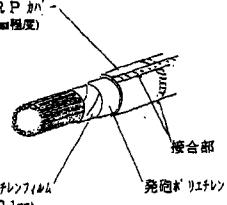
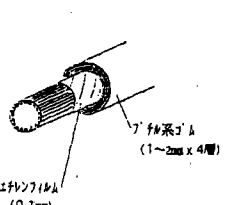
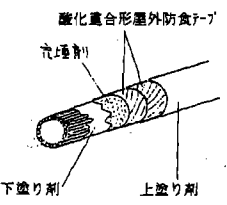
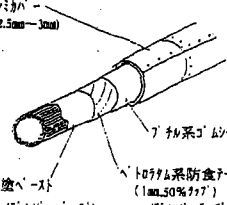
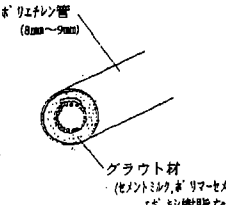
表-4 送気設備機器の仕様

	第一大橋用	第二・第三大橋用
除湿器	シリカゲルハニカム式 (カバー取付け仕様) 乾燥空気流量 2m ³ /min 入口 DB20℃, RH80%のとき, 出口露点 DP7℃以下	シリカゲルハニカム式 (カバー取付け仕様) 乾燥空気流量 4m ³ /min 入口 DB20℃, RH80%のとき, 出口露点 DP7℃以下
プロア	ルーツプロア 空気量 2m ³ /min 出力 2.2kW	ルーツプロア 空気量 4m ³ /min 出力 3.7kW
アフタークーラー	コルゲートフィン式空気顕熱交換器 空気量 2m ³ /min 入口温度 98℃ 出口温度 60℃	コルゲートフィン式空気顕熱交換器 空気量 4m ³ /min 入口温度 108℃ 出口温度 60℃
フィルターユニット	<ul style="list-style-type: none"> ・ラフフィルター ・海塩粒子フィルター ・ULPAフィルター 	

送気設備

図5-3 送気システム

表5-5 補修用としてのケーブル（ストランド）の防食方法比較表

	ワイヤ、ラッピング工法	プラスチックカバリング工法	ゴム巻き工法	防食テープ巻き工法	(防食テープ巻き+アルミカバー)工法	(ポリエチレン+グラウト注入)工法
出来上り 断面構成	ラッピングワイヤ (2mm~4mmφ) 	FRPカバ (2mm程度) 	ゴム巻き (1~2mm x 4層) 	酸化重合樹脂系防食テープ 	防食テープ巻き+アルミカバー 	ポリエチレン管 (8mm~9mmφ) 
工法の概要	ケーブル架設後現場施工となる。 防錆ペーストを表層に塗布した後ラッピングマシンにてラッピングワイヤを所定(一定)張力で緊密に巻き付ける。その後、上塗り塗装を施す。	ケーブル架設後現場施工となる。 あらかじめ工場にて2~3m/ユニットのプレハブセグメントを作成し現場でケーブルに取付け、接合部を同一材料で接合する。 7~10mピッチに伸縮継手を設ける必要がある。	ケーブル製作時の工場施工が一般的である。 ケーブル(ストランド)製作後、ケーブル長相当のゴムシートを接着剤を付けながらすしを巻くように巻き付ける。その後リールに巻き取り現場に運んで架設する。 補修工としては現場でのシート巻となる。	ケーブル架設後現場施工となる。 下塗り剤を表層に塗布後防食テープをゲートル巻きに半重ねで巻く。最後にテープ表面の一次保護剤として上塗り剤を塗布する。	ケーブル架設後現場施工となる。 下塗ペーストを表層に塗布後防錆(粘性)テープをゲートル巻きに半重ねで巻く。更にゴムテープを同じ要領で巻き付け最後にユニット化されたアルミカバーを取付けビス止める。	工場施工+現場施工となる。 ケーブル(ストランド)製作時にあらかじめPE管(ストランド)を通して現場架設する。その後現場で下端から注入ポンプでグラウト材を圧入する。 補修工事には適さない。
施工上の特徴	ケーブル全長に渡る足場を必要とする。 太径ケーブルに有利である。 ラッピングマシン等の設備を必要とする。 ラッピング前の雨水がケーブル内に残存しないよう配慮の必要がある。	ケーブル全長に渡る足場を必要とする。 特別な機械を必要としない。 カバリング前の雨水が残存しないよう配慮の必要がある。	架設時が大がかりな足場を必要としないが補修時が必要。 ケーブル全長が長い場合は巻きにくい。(30m程度まで) 太径ケーブルの実績はない。(PWS169注) 架設中は雨水進入のおそれはないが補修時は配慮の必要あり。 架設時ゴムが破損しないよう取扱いに注意を要する。	ケーブル全長に渡る足場を必要とするが、高所作業車でも施工可能である。 太径ケーブルの実績はない。 特別な機械を必要としない。 テープ巻前の雨水が残存しないよう配慮を必要とする。 下塗り剤、テープに発錆抑制作用あり。	ケーブル全長に渡る足場を必要とする。 特別な機械を必要としない。 テープ巻前の雨水が残存しないよう配慮を必要とする。 表層は糸巻の形状なりに密着できる。 ペースト、テープに発錆抑制作用あり。 アルミカバーで衝撃・太陽光から保護できる。	差部から注入するため大がかりな足場は必要としない。(注入高が高い場合は中継点要) 注入ポンプ等の設備を必要とする。 注入により管内の空気が排出される。
国内の実績 ()内施工年	若戸大橋(1958) 小鳴門橋(1963) 箱ヶ瀬橋(1967) 上吉野橋(1969) 関門橋(1973) 平戸大橋(1976) 因島大橋(1983) 大鳴門橋(1985) 大島大橋(1987) 下津井瀬戸大橋(1988) 北備瀬戸大橋(1988) 南備瀬戸大橋(1988) 他	金谷橋(1966) 八幡橋(1968) 豊里大橋(1969) 植島大橋(1971) 大和橋(1974) かもめ大橋(1975) 六甲大橋(1976) 他	生ノ浦橋(1972) 今津橋(1975) 長柄橋(1978) 他	上笠生子橋(補修)(1989) 摩耶大橋(補修)(1995)	大三島橋(ハンガー)(1979)	日の浦橋(標線)(1980) 瀬戸橋(標線)(1980) 名港西大橋(メッキ線)(1984) 種子島橋(メッキ線)(1988) 岩黒島橋(メッキ線)(1988) リフトなし、完全工場製作(破損)のもの近年多数(但し斜張橋、吊橋、吊橋ハンガーが主流で吊橋主ケーブルはない)
備 考	ハンガーロープ等細径ケーブルでの実績は少ない。	斜張橋に例が多い。	ゲートル巻あるいはプレファブ化すれば現地施工も可能。 ニールセン橋に例が多い。	水道管、石油パイプなどへの実績多数。 近年橋梁ケーブル補修工事への採用が増えている。	石油パイプなどの実績多数。 ケーブルへの適用例は少ない。 六甲大橋(斜張橋)の補修に採用されている(但し表面はプレファブのプラスチックカバー)	HiAmケーブルとして諸外国に実績が多い。 近年は定着部付近の注入材としてポリジエチレンを採用し一般部はポリエチレン材をケーブル表面に直接に完全接触させてポリエチレン被覆とケーブルと一体化したものを工場製作し現地では架設するだけのものが主流となっており実績も多い。

(2) 海外の吊橋

比較的新しい海外の吊橋では、第二チェサピークベイ橋（1973年）で、ペースト、ラッピングワイヤーを用いず、主ケーブル素線を約1mピッチに金属バンドで固定した上で、ネオプレン（液体塗付後シート巻き）を巻き、その上に耐候性向上のためハイパロン塗料を塗装するシステムを採用している。また、ニューポート橋（1968年）では、ファイバーガラス・アクリル素材によるラッピングシステムを採用している。

補修後の防食方法としては、ワイヤーラッピングのほかに、一部区間に試験的にネオプレンゴムや、ミッドハドソン橋で用いられたポリビニル系の繊維強化材料として開発されたハーキュライトがある。特に前述のネオプレンシステムの採用が数多く見られる。

表5-6 海外吊橋における主ケーブルの補修事例

橋名	ブルックリン橋	ウィリアムズバーグ橋	ペアーマウンテン橋	マウント・ホープ橋	ミッドハドソン橋
架橋地	米国 ニューヨーク州ニューヨーク	米国 ニューヨーク州ニューヨーク	米国 ニューヨーク州ビークスビル	米国 ロードアイランド州プリストル	米国 ニューヨーク州バークレー
完成年	1883年	1903年	1924年	1929年	1930年
防食仕様 (当初)	主ケーブル	亜鉛メッキ	亜麻仁油、防錆油でワイヤを保護 (亜鉛メッキなし)	亜鉛メッキ	亜鉛メッキ
	ペースト	鉛丹	鉛丹	鉛丹	鉛丹
	ワイヤラッピング	亜鉛メッキ鋼線	建設当初は、「耐久性金属被覆」と呼ばれる 線ズックの上に鉄の薄板(厚さ約1.6mm)を 設置。後に亜鉛メッキワイヤで再ラッピング。	亜鉛メッキ鋼線	亜鉛メッキ鋼線
	塗装	仕様不明	仕様不明	仕様不明	仕様不明
補修方法	1986年に主ケーブル以外取り替え。 一部(路面以下)ネオプレン被覆。	1922年ワイヤラッピング。 1991年ネオプレン被覆	当初の仕様と同じ。	ネオプレン被覆、ハーキュライトを 試験的に使用。	ネオプレン被覆を試験的に使用。

5. 海外事例

(1) ライン河 クレーベ・エメリッヒ橋 (独：ノルトライン・ヴェストファーレン州)

- 1 構造形式 : 連続トラス補剛桁吊橋
- 2 完成年度 : 1965
- 3 補修年度 : 1980, 1981

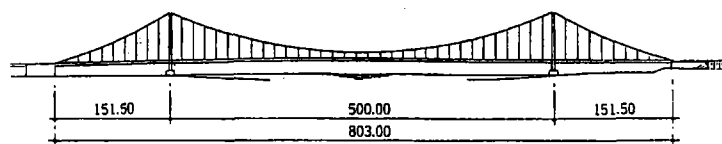


図-1 側面図

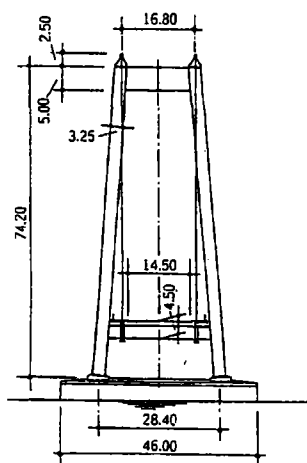


図-2 主塔断面図

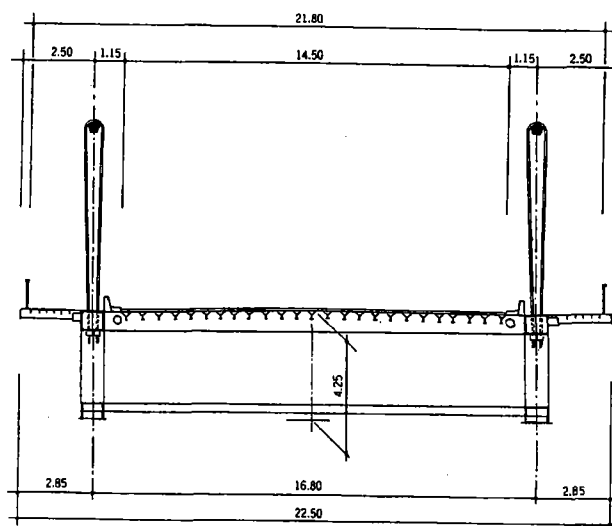


図-3 中央接合部の補剛桁断面図

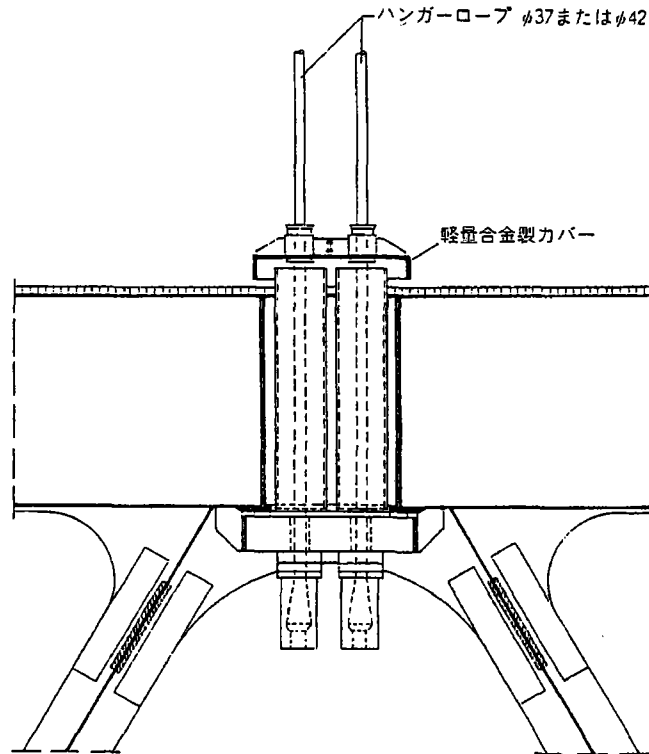
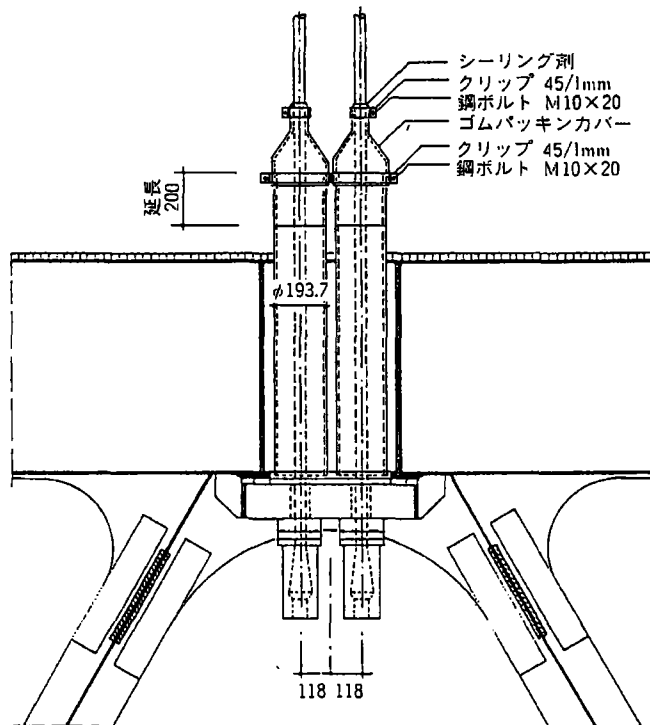


図-4 架設当初の上弦材でのハンガーロープ定着と防食カバー



改良された防食カバーと補剛桁上弦材でのハンガー定着部

－4 損傷の内容

エメリッヒ橋の100本（ $2 \times 50 = 100$ ）のハンガーは、それぞれ2本のロックドコイルロープで成っている。これらは1格点で4つの定着ソケットを持ち、トラス補剛桁の上弦材の下で直接定着されている。個々のハンガーには、ケーブルバンドが付いており、それによりアンカレイジに定着されている主ケーブルと接合されている。ケーブルバンドのサドル部はくらがけされて、ロープは反転している。これらのハンガーの格点間隔15.15mである。

ハンガーの下部の定着部は、溶接接合された管との境界部分を除いて、歩道版と補剛桁の上弦材から突き出ている。定着ソケットはトラス補剛桁の上弦部に、支圧板と溶接されたダイアフラムで支えられている。

表面水に対するケーブルの定着部構造の防食保護のために、橋の架設時に、4本のハンガーの周りにゴムパッキンを持つカバーが取り付けられている。ハンガーの自由な変形を拘束しないように、カバーは桁の鋼構造部材とは接続されていない。

しかし、これらのハンガーの定着部カバーは不十分であることが判明した。水、ゴミおよび塩化物は、トラス上弦材を突き抜ける管を通して、ハンガー定着端まで達している。

簡単に点検のできないハンガー定着部分では、重大な点状腐食と面状腐食が発生していた。しかし、カバーの上部でも、ハンガーの外表面が部分的に腐食していた。15年経過後、2層の下塗り塗装（鉛丹）と2層の上塗り塗装（雲母鉄粉）の膜厚160 μ mの厚さから成るアルキド樹脂塗料は著しく劣化しており、層間はく離が見られ、その下には錆が発生していた。

ケーブルバンドの上のクランプ部では、錆の発生は見られなかった。ここでは架設前にハンガーロープが保護バンドで被覆されていた。

－5 損傷の原因

ハンガー定着部における腐食の発生は、上弦材を突き抜ける管を覆うために取り付けられたカバーが、部分的に不十分なことが原因となっている。塩分を含む霧、ゴミおよび湿気は、定着ソケットや定着部等点検が困難なところにも侵入し、そのことがここで記述された腐食発生の原因となっている。

そのうえ、さらに橋梁架設時に、ハンガーロープに塗布されたアルキド樹脂系（フタル酸樹脂）をベースとする塗装方法は、脆化しやすく有効でない。ハンガーロープはフレキシブルな構造部材で、橋梁の荷重変化や温度変化に対して弾性変形し、それに伴ってひずみが生じる。このため、外周部の各鋼線にわずかな変位差が生じることになる。

15年間の供用で塗装が劣化しているために、前述の形状変化による損傷は免れないものと考えられる。大気中の湿気と有害成分は、塗装の割れ目から徐々に浸透していき前述したような腐食が進行する。

－6 補修・補強の方法

桁側定着部におけるハンガーの補修において、2つの方法がとられた。

- ・ 歩道部デッキプレートの上の防錆カバーは、ゴミや湿気を遮断するように遮水度の高いカバーに変更すべきである。
- ・ ハンガーの塗装はやり直すべきである。それもロープ断面外周部鋼線の伸びや変形に弾性的に追従できるような塗料を使用すべきである。

補修作業始める前に、発生した腐食により、ハンガーがどの程度影響を受けているか、また、どの程度耐力があるかが検査された。そのために、1979年に腐食損傷を受けた1組のハンガーを取り外し、新しいハンガーに交換した。取り外されたロープはボッフムのケーブル試験所で、その腐食状況と切断荷重が調べられた。繰返し引張荷重を受けたものと受けないものに対して、引張強度試験が行われた。その試験によると、このハンガーは、14年間橋梁の活荷重により応力を受け、また、その期間に生じた腐食の影響より、疲労試験の結果では新品のロープに比べ耐力はやや劣るものの、なお破壊に対しては十分な安全度を持つことが明らかになった。

道路管理局は、構造物ハンガーはそのまま存置するが、さらに腐食が生じないように、再塗装することを決定した。

このためトラス補剛桁の下弦材に取り付けられた作業台を用いて、一对のハンガーは油圧ジャッキにより段階的に荷重が取り除かれた。支圧板とシムプレート（調整板）は取り外され、4つの定着ソケットは上弦材に貫通させた管を通して抜き取り、床版（多目的車線）上に置かれた。

ハンガーの端部は、清浄度SA21/2を得るためにスラグ砕粒、粒径0.25/1.4mmによりブラスト処理された。新しい塗料に対して、ロープ表面はきれいに洗浄し、表面の腐食傷痕も機会的に滑らかに処理された。これは、ケーブルの疲労強さに関して有利な影響を及ぼす。その後、ハンガーには膜厚330μmの新しい塗装がなされた。

・ 下塗り塗装

ポリウレタンとクロム酸亜鉛の2成分から成る塗料

(FOLIC PCR801041 「エメリッヒ橋仕様」)

硬化時間 20分、膜厚 100μm

・ 第1層および第2層の上塗り塗装

ポリウレタンと雲母鉄粉の2成分から成る塗料

(FOLIC-ENA 「エメリッヒ橋仕様」)

硬化時間 30分、膜厚各層 150μm

塗料の2つの構成物質である主剤（樹脂）と硬化剤は、3層ともすべて現場で、6：1の割合で混合され、3～4時間間隔で順々に塗付した。

その後、4つの定着ソケットが、再び取り付けられ緊張された。

管の間隙の上に古い防護カバーはもはや使用せず、新しい管は約200mm上に延ばし、各ロープはその周りを密閉したゴムカバーと鋼バンドとでしっかり結束し、新しい構造に取り替えられた。

このカバーの上部の密閉に対しては、ポリウレタン、クロム酸亜鉛の特殊な充填材を用いた。

また、デッキプレートより上のハンガーにも、新しい塗料が塗られた。ハンガーの周りに鋼管から成る作業足場を築き、作業足場から清浄度SA2 1/2が得られよう機械的に錆がとられ、続いて膜厚330μmとなるように新しく塗付された。

・ 下塗り塗装

ポリウレタンとクロム酸亜鉛の2成分から成る塗料

(FOLIC PCR801041 「エメリッヒ橋仕様」)

混合比 主剤 : 硬化剤 = 6 : 1

硬化時間 20分、膜厚 100μm

・ 第1層上塗り塗装

ポリウレタンと雲母鉄粉の2成分から成る塗料

(FOLIC-ENA 「エメリッヒ橋仕様」)

混合比 主剤 : 硬化剤 = 6 : 1

硬化時間 30分、膜厚各層 150μm

・ 第2層上塗り塗装

ポリウレタンをベースとした2成分から成る塗料

色 RAL 3000 (BICOMPON1432 「エメリッヒ橋仕様」)

混合比 主剤 : 硬化剤 = 3 : 1

FOLIC-ENA 「エメリッヒ橋仕様」)

硬化時間 4時間、膜厚各層 80μm

塗料の2つの成分は現場で手練りされ塗装された。

すべての塗装作業に際して、構造部材の被塗面温度は大気の湿度に対して必要な露点温度より最低

3度以下高く保つように注意した。

－7 今後の対策および反省

①この種の損傷を回避するために

- ・ ケーブルの腐食損傷に対して、ケーブルワイヤの製造時において溶融亜鉛メッキ鋼線の使用は有効である。
- ・ ケーブルはフレキシブルな構造部材であるので、変形に追従できる系統の塗料を用いた方がよい。アルキド樹脂系塗料は、時が経つにつれて劣化するので適当でない。

②補修・補強工事に関する注意点

- ・ 2成分から成る塗料の品質は、本質的に主剤（樹脂成分）の硬化剤の強力な結合力に左右される。従って、念入りに注意深く管理すべきである。
- ・ ケーブル表面は乾燥し、きれいに洗浄されてなければ、塗装に対して十分な付着性能は達成されない。それゆえ、周囲の大気露点に対してケーブル温度は十分に高く保つように注意すべきである。
- ・ 塗装後9年たった新塗装の詳細な検査により、ケーブル外表面での塗装も、下塗り上の上塗り第1層塗装も優れた付着性能を保っていることがわかった。ただし上塗り第1層と第2層の間の付着は改良が必要である。
- ・ 上塗り第2層塗装（B I C O M P O N）は、フレキシブルなものでなければならない。これまでのB I C O M P O N塗料は、その下の層のF O L I C - E N Aよりもわずかに変形性能が良くない。

(2) ライン河 レバークーゼン橋 (独: ノルトライン・ヴェストファーレン州)

- 1 構造形式 : 3 径間斜張橋
- 2 完成年度 : 1965
- 3 補修年度 : 1982, 1983

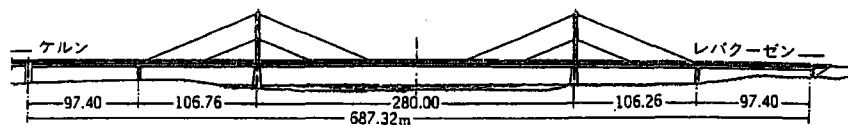


図-1 側面図

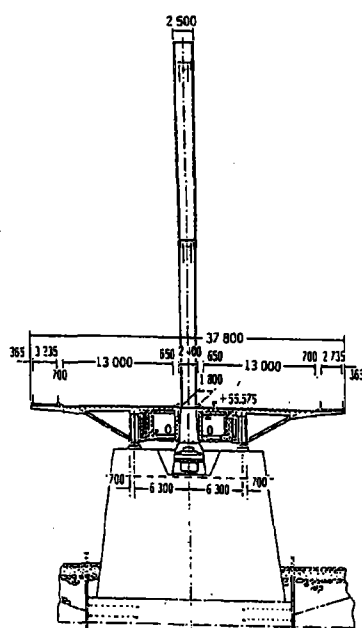


図-2 主塔部断面図

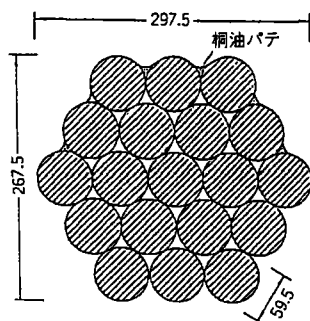


図-3 斜めケーブル断面

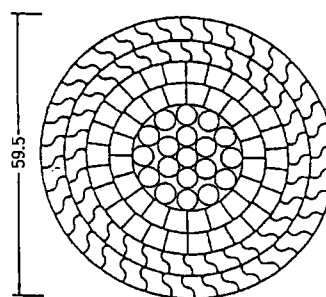


図-4 1本のロックコイルロープ断面

－ 4 損傷の内容

橋梁架設時、斜めケーブルは当時の技術で防食されていた。それは数種の防食方法を組み合わせたものであった。

はじめに、すべての裸の鋼線をより合わせ、ロープ内部の空隙部に鉛丹塗料が塗られた。

19本の橋

梁用ロックドコイルロープから構成される斜めケーブルの組立作業中、再度、下塗り鉛丹塗料がなされた。その上に塩化ゴム添加剤をいれたフタル酸樹脂をベースとする上塗り塗料が塗布された。ケーブルの表面を被覆して密閉するために、個々のロープの隙間に桐油パテが詰められた。1本のロックドコイルロープは、裸の鋼線から構成されている。

橋面上で溶融塩を使用したことにより、斜めケーブル下部領域における錆の被害が大きくなったこと

が判明した後、1972年に全部で16本のケーブル端部は、補剛桁の定着用ブラケットから主塔方向に約20mの長さまで、ポリウレタン－エラストマーゴムから成る被覆を施した。そのうえ、ヒポロンをベースとするポリウレタンラッカーで上塗り塗装は行われた。

1980年には、既存の塗装が劣化し、一部では完全にはく離しているのが確認された。

ケーブルの

1本1本のロープが扇状に広がっているブラケットの下の部分では、黄褐色の液体がにじみ出していた。ケーブルの表面に詰められていた桐油パテは幾重にも裂け、ぼろぼろになっていた。

－ 5 損傷の原因

防食塗装の早期劣化の原因は、橋梁架設地帯における反応性の高い工場排気物である。

すぐ近隣には

bayer社レバークーゼンの科学工場がある。

下側のケーブル端に発生した液体は、ノルトライン・ヴェストファーレン州材料試験所で化学的に検査された。

それは、主に、鉄化合物、カルシウム化合物および水とで合成された脂肪酸とアミノ油から構成され

ていた。そのうえ、鉛化合物、亜鉛化合物、流黄化合物、塩化化合物も確認された。脂肪酸はpH値7以下を示していた。これら混合液体は、全体として腐食を促進させるものと評価された。

－ 6 補修・補強の方法

ケーブルの各ロープの隙間に反応性の液体がすでに浸透していることが確認された後、

補修工法とし

て、ケーブル内部のすべての隙間へ防食材料の十分な注入を行う方法が選ばれた。大気中に残存する反応性のある物質がケーブル内に侵入することは、ケーブルの上塗り被覆によって阻止することができる。この場合欠点として、最外層の各ロープおよび鋼線に対して、以後の点検が完全に不可能になるという結果になるにもかかわらず、この処理法が採用されることになった。

注入に対して予定された材料 - 2成分から成る溶剤不要のポリウレタクロム酸亜鉛 (FOLIC 800966) - に対して、作業前に詳細な材料試験が実施された。

- ・ 建設現場での条件下で、24日の硬化時間後、ショア-硬度Aは56と59の間の値に達した。
- ・ 引張付着試験 (アドヒージョンテスト) による付着強度は1.9~2.5 N/mm²の間にあった。
- ・ 隙間充填の検査は非常に良い結果だった。しかも、各ロープ間の小さな隙間 (0.5 mm以下) にも十分に充填された。この充填剤自体の気泡形成は、非常に小さいもの (0.2 mm以下) であった。
- ・ この充填剤は水の影響に対して非常に敏感である。付着応力は非常に低下し、水と硬化剤の反応は気泡形成を促進させるので、海綿伏になる。それゆえ、充填剤の注入前にケーブルは十分に乾燥しておく必要がある。
- ・ 硬化していくうちに、充填剤の体積は約2%減少する。
- ・ 防食効果は塩水噴霧試験と結露しけんにより検査された。それによると、最小3 mm厚が必要であることが判明した。
- ・ 充填剤を注入するための数多くの方法に関して、前もってそのプロセスが検査された。ケーブルを取り囲んだ鋼製型枠の内側へ注入すること以外、他のすべての試みはうまくいかなかった。

最小3 mm厚の充填剤によりケーブルの外周面のむき出したところが被覆されるように、35 mmの作

業長さで、鋼製型枠により六角形のケーブル束がカバーされた。注入剤からの型枠のスムーズな取り外しは、型枠内側のテフロン塗装により確保された。ケーブルを囲む型枠の接合部分と継目は気密に仕上げられ、型枠自体に注入パイプおよび空気抜きパイプが取り付けられた。

充填剤と注入方法が決定された後、作業は次のように行われた。

- ・ 防食処理しなければならないケーブル領域への足場組みおよびその周囲のカバー。
- ・ 清浄度SA 2 1 / 2、粒径0.5 / 1.4 mmの溶解炉スラグ砕粒を用いてブラスト処理

をする。すべてのブラスト材の残りは吹き除くか、あるいは、ブラシかけにより念入りにケーブル表面から取り除く。

- ・ 作業空間の連続的な暖房によりブラスト作業は最低10℃で行われる。それゆえ、注入の開始時には、構造用ケーブルの外表面温度は最低5℃に達した。
- ・ ケーブルのブラストと洗浄終了後すぐに、ポリウレタン-クロム酸亜鉛から成る一時的な防食塗料が塗布された。
- ・ 型枠を取り付ける前に、ケーブルの六角形状を保護するために、当該のクリップバンドの表面温度は、周囲の大気の露点より最低5度以上高く保たれなければならない。暖房のみではその温度までケーブルの表面温度が上がらない場合、付加的な空気の乾燥が行われた。
- ・ 作業過程においてケーブル1m当たり14～16kgが必要とされる充填剤は、25℃～30℃の間の温度の暖房コンテナの中で貯蔵され、そこから型枠の内部に直接充填された。
- ・ 充填工程は30～35mの作業長となり、各々、下から上へ行われた。
- ・ 充填剤の完全な硬化を保証するために、充填過程終了後、作業空間の最低温度は10℃で24時間以上保持された。
- ・ 以上のように施工された六角形の被覆体について2層の上塗り塗装が行われた。

第1層上塗り塗装

ポリウレタンをベースとする雲母鉄粉から成る2成分塗料 (FOLIC-ENA)、膜厚
150 μm

第2層上塗り塗装

ポリウレタンをベースとする2成分から成る塗料 (BISOMPON1432)、膜厚
80 μm

前述の作業は、主に、防食塗装としてはあまり適当でない季節に行われた。

それは1982年8月27日に始められ、1983年6月21日に完了した。現場において、冬季の

施工作业中、防食作業現場の養生用テントの設置、暖房および空気乾燥を行った結果、予定の納期で行うことができた。

保持されるべき温度、湿度および露点温度は、予備作業の間には毎日3回、充填の間には1時間ごと

に測定され記録された。注入工法試験を実施した連邦道路工学研究所は測定計画を作成し、測定に協力した。

暖房と空気乾燥を組み合わせると、ケーブルの外表面温度と周囲の大気の露点温度との間に要求され

た温度差が著しく大きくなることがわかった。特に、暖房は有効であることが判明した。一般的な気象学上の条件下での施工に応じて、要求された露点温度差5度を保持するために、暖房と乾燥の2つの処置を使い分けた。

上塗り塗料 FOLIC-ENAとBICOMPON の塗装後約4週間して、ライン左岸の2本斜め

ケーブルの上部に、大きなふくれが観察された。ふくれを開くと、上塗り第2層の密閉した塗膜の下にベタベタした物質があることが確認された。これが上塗りの塗料のはがれの原因となった。

構造物から取り出された材料試料と予備試料とで行われた適性検査の比較によると、硬化剤混入量が適性試験時よりも施工時に25%低くなっていることが確認された。

この硬化剤不足による欠陥が、第2層上塗り塗料から第1層上塗り塗料にフタル酸エステルの移動を引き起こした。それが原因で軟化と分離が生じたと考えられる。欠陥のある部分の上塗りは取り除かれ、塗り直された。

－7 今後の対策および反省点

①この種の損傷を回避するために

- ・ ケーブルの腐食損傷は、熔融亜鉛メッキした鋼線を使用すると減少した。
- ・ 斜張橋は今日では工場で防食処理されたケーブルを用いて建設されるので、本橋のような多くのケーブルから構成される空隙は回避される。

②補修・補強工事に関する注意点

- ・ 下地が乾燥し、きれいに洗浄してあれば、ケーブルの十分な塗料の付着が達成される。それゆえ、周囲の大気露点に対するケーブル温度を十分高く保つように注意すべきである。
- ・ 品質試験の材料については、十分な量の予備試料を取りだすべきである。
- ・ 塗装作業に使われた材料に関しては、さらに鑑定検査を行うべきである。

(3) ライン河 ボン・ノルト橋 (独: ノルトライン・ヴェストファーレン州)

- 1 構造形式 : 斜張橋
- 2 完成年度 : 1967
- 3 補修年度 : 1983

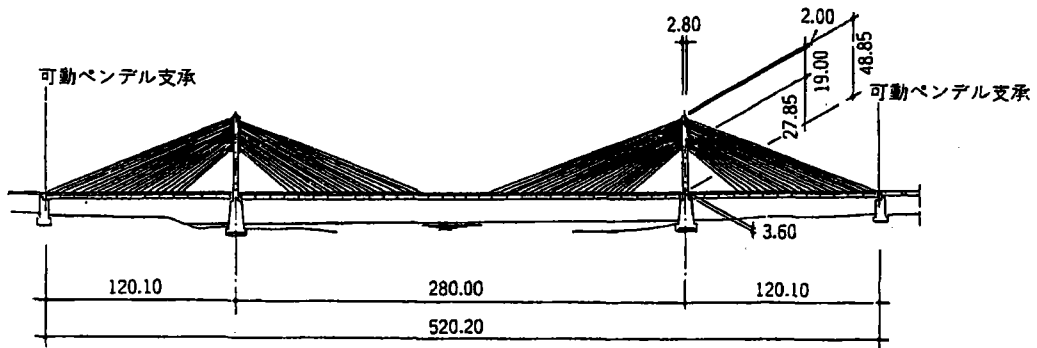


図-1 側面図

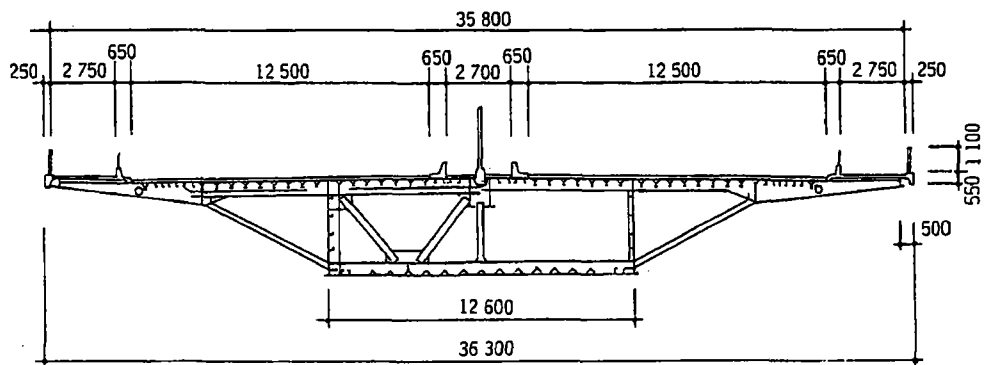


図-2 主桁断面図

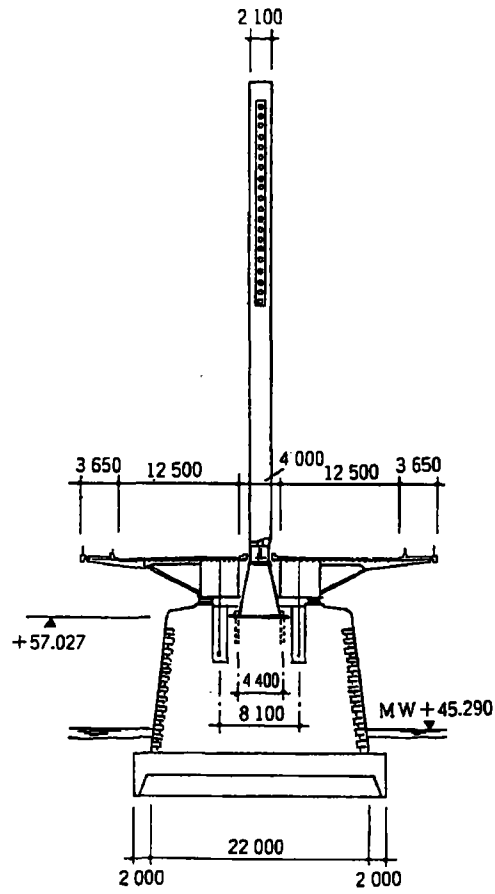


図-3 主塔部断面図

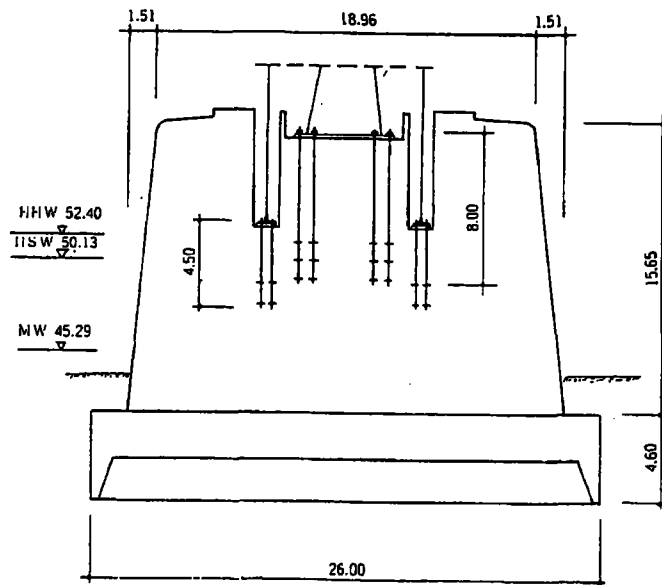


図-4 PC 鋼橋による橋脚と主塔脚部および主桁の固定

－ 4 損傷の内容

ライン河ボン・ノルト橋の2つの鋼製主塔の基部は、1本の長さが約8m、φ32の鉛直PC鋼棒

で河川橋脚のコンクリートに剛結されている。また、同様の方法で、主桁は主塔の左右に配置されているやや短い約4.5mのPC鋼棒で橋脚に定着されている。

さらに分離橋脚部において、引張り・圧縮が作用する鋼製ペンデル支承にも基部への定着部材として

この種の鉛直PC鋼棒が用いられている。

防食方法としては、シース管の中にPC鋼棒を通した後、下部測定着部で連結された横管を通してグ

ラウトを上から注入することが計画された。しかしこの計画は、橋梁架設時すでに実行不可能であることが判明した。

上部工を橋脚にしっかりと固定するPC鋼材に関して全部で336本のうちの164本には、セメン

トグラウトをきちんと注入することができなかった。なぜなら、橋脚内側への立入りが不可能であったためである。

この欠陥の原因は、部分的には、橋脚架設中にシース管が損傷したことと、さらに、上から注入する

際、シース管の中が詰まったことにある。

構造的に問題のない範囲で、橋脚内のPC鋼材とコンクリートの間の付着効果を部分的に断念し、グ

ラウトの不十分なシース管には、防食のため、亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) が詰められた。また、試験的には6本のシース管には、鉛丹を注ぎ込んだ。

1977年の橋梁点検の際、鉛直PC鋼材の上端において防食用充填剤がなくなっているのが解った。

そのためPC鋼材の状態および防食用充填剤の存在を検査するために、各橋脚につき1本のPC鋼材のプレストレスを抜くことが決定された。検査されたPC鋼材に亜硝酸ナトリウム充填材はもはや存在していないことが明らかになった。従って、セメントグラウトを注入していない鉛直PC鋼材の防食は、すべて不十分であるとは考えなければならなかった。

－ 5 損傷の原因

生じた損傷の根本的な原因は、橋梁架設時にどのような方法でシース管もグラウトを注入したかにあ

る。その当時行われた鉛直および斜めのPC鋼材に高所から注入する試みには、同様の欠陥が見られた。グラウトは、流れ落ちるとき、途中で管内部に付着し、それがシース管の

詰まりを誘発している。それゆえ、今日シース管にグラウトを注入する場合には常に低い位置からの注入が要求される。

このようなグラウトの下向き注入を橋脚表面の花崗岩石積みから行うとすれば、数多くのホースが必要となり、技術的な理由からこれは許可されなかった。

さらに、橋脚内部のコンクリートには、とりわけ施工継手部において、多孔質領域があり、空気と水が浸透しやすいことが判明した。この多孔質性により、防食のために注ぎ込まれた液状の NaNO_2 が、年とともにシース管下部から流出していた。

そのうえ、鉛直PC鋼材の下部定着領域は、変動するライン河の水位の高さにあることで、湿気と酸素の入れ替わりの影響で、PC鋼材の腐食が生じやすい環境にあった。

－6 補修・補強の方法

補修方法の選定に関しては、有効な注入剤とそれに応じた注入方法の選択のための詳細な試験が必要であった。橋脚内部へは立ち入ることができないので、補修方法にあたっては、上側PC鋼材端から下に注入することしかできないこと、シース管に残っている空洞は部分的に水で満たされていること、PC鋼材とその周囲のコンクリートとの間の付着が得られるようにすることに注意する必要があることがあった。

とりわけ、注入剤はPC鋼材に対して確実な防食をもたらさなければならなかった。

3つの異なる製品が検査された。

- a) Follic HN 156B、硬化剤、Unitecta社
- b) Densofiex-primer、Denso-Chemie社
- c) Dywipox SPK、Dickeshoff & Widmann社

a)は、活性防食成分としてクロム酸亜鉛を含む液状のエポキシ樹脂である。その密度は鉛色素の添加により $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$ に増大される。それは極めて細かい亀裂や管の中に浸透し、これにより、そこにあった水が排除される。さらに、長時間液状を保つ長所がある。23℃で、5時間の硬化時間である。欠点として、これらの材料の個々の成分は均質にすることが困難で、このため注入樹脂は、都合の悪い沈殿挙動を示すことが判明した。この樹脂は、最終状態で弾性のままである。それゆえ、PC鋼棒とコンクリートの付着作用は期待できない。

材料 b)は、軽い液体であるベンジンの中に高付着性の防食性能を持つ15%の溶液である。水に対して、表面張力が著しく低下するために、小さな毛細管にも、ほぼ密閉されたコンクリート

の空隙にも、水が届くことができ至るところに浸透する。この材料の蒸発により、鋼材は防食性の強い不水和性を与える強い付着力のあるべとべとした薄膜で覆われる。シース管内の隙間は、この方法では完全に満たされないの、後処理が必要である。欠点は、この系の耐久性が注入時の鋼材表面が乾燥しているかどうかによって左右されるということである。この前提条件が満足されるかどうかは、問題の残るところである。PC鋼材とコンクリートの付着作用は期待できない。

c)は、鉛丹と硫酸バリウムの混合物を持つポリアミン硬化性エポキシ樹脂である。密度は 1.75g/cm^3

で、高い容積率にもかかわらず、低い粘性と毛細管へのよい浸透能力がある。鋼材表面の完全な湿潤と材料のアルカリ反応により、注入初期により防食が達成される。わずか2時間の硬化時間であり、a)の場合より短い。この材料でPC鋼材とコンクリートの付着が達成されることは有利である。

PC部材の付加的な防食として、c)に記述された材料が選択された。

防食材料の注入に関しては、3つの方法がある。

- ・ 真空注入法
- ・ 圧力注入法
- ・ 流し込み法

同時に、シース管および下のPC鋼材定着部の空洞にたまっている水を除くための実験が行われなければならなかった。このため、再び、種々の処理法が考案された。

- ・ 真空状態にすることで水を気化させる。
- ・ アルコールを用いて、空隙の洗浄、その後圧縮空気により乾燥
- ・ 逆流原理による水の排出

これらの水の除去法は、防食材料の注入方法に応じて、それぞれ1つずつ組み合わせられる。

アルコールを用いた空隙洗浄と組み合わせた圧力注入方法は、シース管が時折詰まっている状態では

使えないことがわかった。

また防食材料の流し込みに関して、逆流原理的に水を排出させる方法は十分であるが、防食の効果に

関して、付加的なコントロールができるように、流し込み法と真空注入法の組合せが選択された。

真空法によって空隙の大きさを測定する予備試験が行われたが、コンクリートの多孔質部分を通して、

外の空気が隙間に流れ込むので、正確な結果が示されなかった。それにもかかわらず、基準値としてこの測定は、注入剤の量を予測し、施工管理するのに利用された。

シース管の内部において望まれる完全な湿気の蒸発は、真空法により達成することがで

きなかった。

特に、下の緊張定着部での空洞、あるいは2つのシース管間の横管のように、大量の水があるようなところでは達成することはできなかった。しかし、注入された防食材料の密度が大きかったので、排水は成功した。排出された水は目に見えて逆流して上に流れ出た。

シース管へは上からは近づくことができないので、まず、PC鋼材が1つ1つゆるめられ、上側定着

プレートを取り外して、真空器および圧入器のための接続口が備えられている定着プレートを新しく設置した。その後、PC鋼材はすぐに再緊張された。

続いて、横管でお互いに結合されたPC鋼材の一方から、2本のPC鋼材の空洞に、低い圧力がかけ

られた。その時、真空にした空気の体積が測定され、その後、注入される防食材料の量が照合された。2本のPC鋼材から4 barの圧力で低圧のシース管に注入剤が注入された。2つの緊張定着治具の空洞が満たされるまで、圧力は保持された。続いて、シース管は、取付けロートにより、通常の圧力で硬化が終わるまで、再び注入剤で満たされた。このとき、空気と水がより重い注入剤により排出され、上に浮かび出た。

－ 7 今後の対策および反省点

①この種の損傷を回避するために

- 鉛直あるいは斜めのPC鋼材は、原則として最低点から上にセメントグラウトを注入すべきである。

この例の場合のように、これが不可能なときには、今日では、アンボンドPC鋼材、あるいは、アースアンカーのために開発されたような防食システムの利用が推奨される。

②補修・補強工事に関する注意点

- 特殊な防食システムの使用の前には、各々の使用目的を考慮して、その特徴を念入りに調査すべきである。
- 選択された防食材料の使用に際しては、十分な確認試験を行うべきである。
- 細い空洞も確実に満たされるように、今回で用いた材料に対する注入樹脂の硬化時間を引き延ばすことは望ましいことである。
- シース管において大量の空気漏れが生じなければ、真空法での空洞測定が可能となり、充填剤の注入ができるようになる。
- 空洞にある水の排水に関しては、今回使用した注入剤はよい効果を示した。コンクリートとPC鋼棒の表面での水膜も排除された。

(4) ライン河 ローデンキルヘン橋 (独：ノルトライン・ヴェストファーレン州)

- 1 構造形式 : 連続補剛桁吊橋
- 2 完成年度 : 1954 (再建)
- 3 補修年度 : 1985

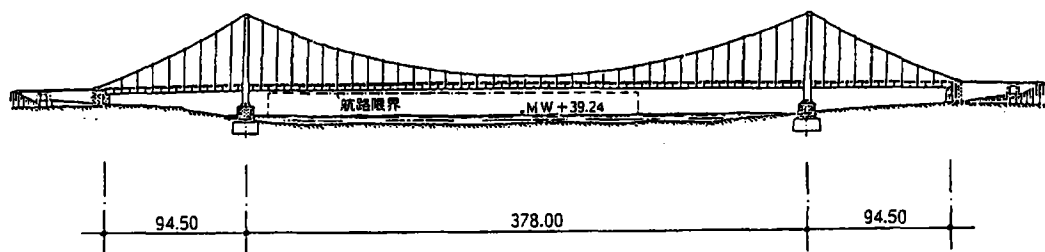


図-1 側面図

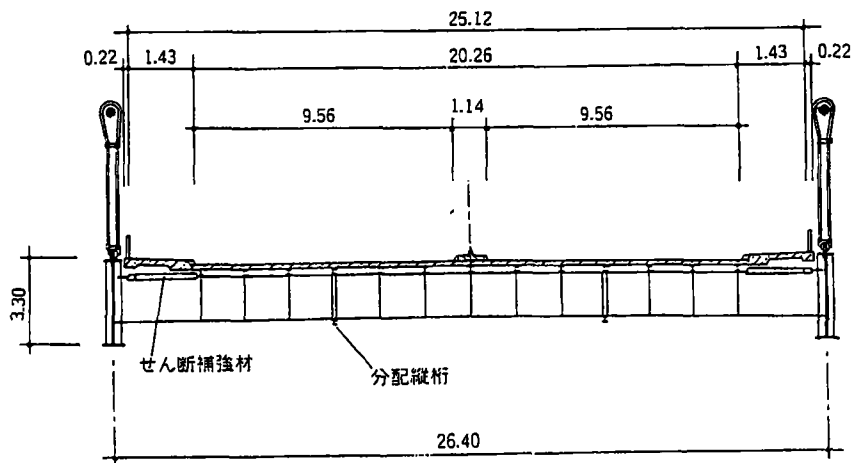


図-2 補剛桁断面図

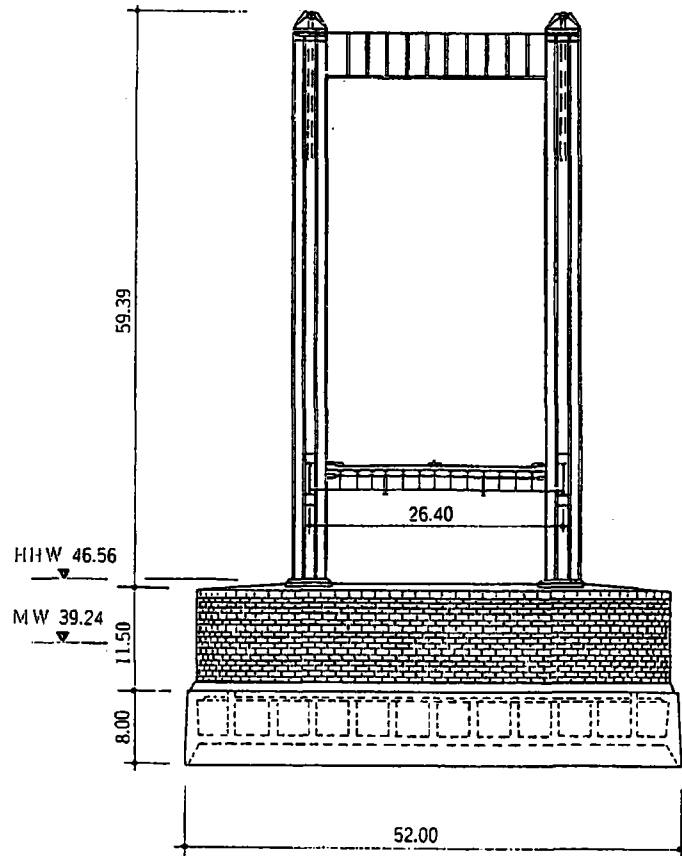


図-3 河川橋脚および主塔

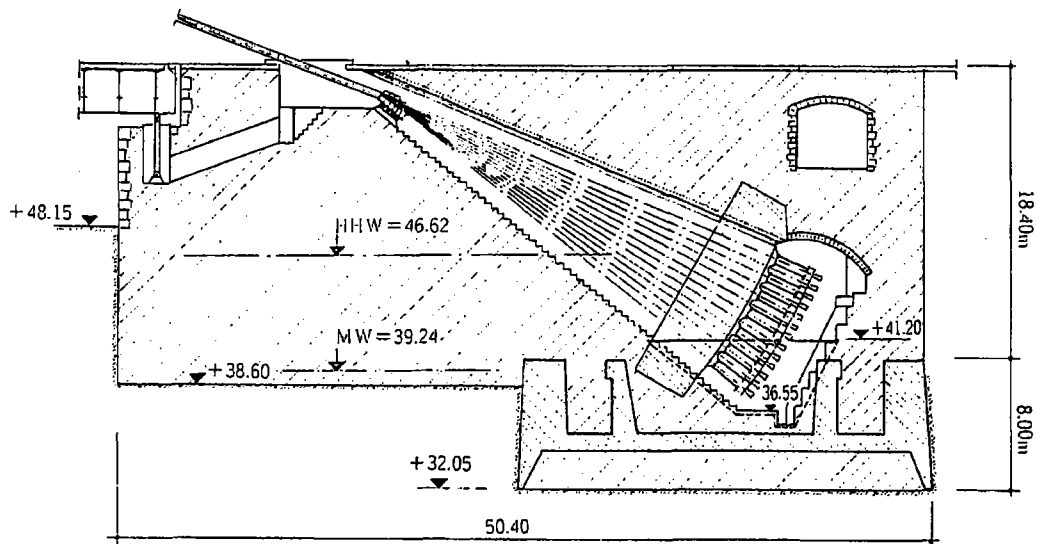


図-4 アンカレッジにおけるケーブル定着

－ 4 損傷の内容

吊橋の主ケーブルは、重力式く体として設置されアンカレイジ橋台に定着されている。この橋台部の床版面においては全体ケーブルとして配置されており、そこからスプレーサドル室に達している。スプレーサドル室の入口には、スプレーサドルがあり、ケーブルはそこで扇状に分岐され、各々のケーブル下端は定着ソケットおよび支圧板を用いて、鋼製横梁に定着されている。

この横梁は高さ 2 m のリベット接合された鋼構造より成り、橋軸に対して直角に配置されており、その支承反力は線支承を介して側面のコンクリート壁に伝達されている。屋根瓦のように置かれた 200mm 厚の支圧板は、各々 2 本の横梁で支持されており、ケーブルストランド $\phi 54\text{mm}$ が通るように 75mm に開孔を有している。

スプレーサドル室は大部分がライン河の水位変動の位置より下にある。

1983 年の橋梁主点検において、スプレーサドル室の鋼製構造部材に腐食損傷が確認された。

- ・ 横梁間では、ケーブル下側で塗装がはがれて錆びており、ケーブル上側では多くの錆傷痕が確認された。
- ・ 錆傷痕は一部ではむき出しで露出しており、また一部では腐食した旧塗装を取り除いた後はじめて目視された。
- ・ 数ヶ所で旧塗装は完全にはく離していた。
- ・ 扇状に張られたケーブルの上列部において最もひどい塗装の劣化が見られた。
- ・ 支圧板の手前の約 2 m には、ケーブルの周囲に水止め垂鉛クリップが配置されていたが、すべてのケーブルに発錆が見られ、一部では錆傷痕もしくは水滴析出物として塩化物が確認された。しかし、この水気が多い抽出物は、硫酸塩を含んでいなかった。測定された pH 値は 7.3～9.6 であり、これは付加的なカルシウムの影響のためにアルカリ性の領域に近くなったのであろう。
- ・ ケーブルの多くは、支圧板の開孔の片側で接していた。ここでは、横からの圧縮力のほかに、すり減り腐食も生じたものと考えられる。
- ・ リベット接合された鋼横梁の塗装は、ふくれ、錆傷痕およびはく離による損傷を受けていた。一部の大きな面状のはく離は、第 1 層目の下塗り塗装だけが鋼材に付着し、第 2 層目の下塗り塗装と 2 層の上塗り塗装は、はがれ落ちていることが特徴的であった。ふくれ部分の塗装の下は、錆びていることが判明した。
- ・ 構造物の形状によって、上部横梁の上に水抜き穴のない排出されない部分があった。そこには、厚い汚れた層が堆積し、防錆塗装は著しく劣化していた。

－ 5 損傷の原因

前述の腐食損傷は、主にスプレーサドル室およびケーブル進入口の内部における特殊な気候条件に帰

せられる。ここでは、早対湿度は90%、室温8.6℃～9.6℃で、常に外気の影響に左右されない状態にある。

スプレーサドル室の底は、ライン河の標準水位より下2.7m、高水位伸した10.1mのところにある。

橋台が受ける外水圧はこの水位の状態に対応している。

橋脚躯体は、1938年に鉄筋コンクリートにより施工された。2.5mの壁厚にもかかわらず、施工

後すぐに水漏れのあることが判明した。高水位時の水の浸透は激しく、下段ケーブルのケーブル端部は水に浸っていたので、スプレーサドル室に排水ポンプが設置された。

部分的に、橋台上から表面水を排水すべき排水管が損傷していたので、表面水がコンクリートく体に

浸透し、やがてはスプレーサドル室に浸透していった。

スプレーサドル室天井およびスプレーサドル室はレンガ積みアーチ構造であるため、上から浸透する

水を止めることはできなかった。これが上段ケーブルの塗装が著しい損傷を受けた理由である。

ケーブル定着部に対する鋼構造部材の詳細検討において、厳しい環境に対する有効な防食工法は採用

されていなかった。

- ・ アンカーガーダーは、水抜き穴あるいは排水口がなかったため、くぼみに水が集まった。
- ・ 支圧板では、むき出しのシムプレート（調整板）とケーブルソケット前面の間に、湿った空気の溜まり場ができていた。その中では、空気の移動はできなかった。
- ・ ケーブル定着部のすべての支圧板は全面に塗装されていた。塗装された板間における摩擦抵抗力は非常に小さいので、ケーブルがある程度の傾斜となる場合には、ケーブル定着部は水平方向の移動に対してしっかりと固定されず、位置が不安定となる。

－6 補修・補強の方法

補修にあたって、まず、ケーブルの下のシムプレート（調整板）と支圧板が取り除かれた。この撤去

は両隣の支圧板上の特殊なジャッキ台で支持された油圧ジャッキを用いて、ケーブル端を2mm定着部から引き抜いた状態で行われた。

シムプレートと支圧板には、後で同じ位置に再び取り付けることができるように、取り外す前にマー

キングがなされた。

これらの構成部材は清浄度 Sa3 を得るようにブラスト処理により錆がとられた。シムプ

レート相互

の接触面は、相互の移動を妨げるように、塗装をせず、他のすべての面は以下のように塗装されている。

- ・ 下り塗装

アミン硬化剤とポリウレタン・タール化合物の中にクロム酸亜鉛、膜厚 150 μm

- ・ 第1層および第2層上塗り塗装

アミン硬化剤とポリウレタン・タール化合物の中に雲母鉄粉、膜厚 150 μm

ケーブルソケット、支圧板および支圧板からスプレーサドルまでのケーブルも同じやり方で、清浄度

PSt3/St3 となるよう機械的に錆をとってから塗装された。鋼製アンカーガーダーおよび他のすべての鋼製治具は、清浄度 Sa2 1/2 を得るようブラスト処理により錆が落とされ、同じように塗装された。

支圧板は、ケーブル外表面と開口部の内壁が接触しないケーブル位置となるよう修正された。

支圧板上側とケーブルソケット前面の間の端部領域において、ケーブルはさらなる腐食に対して次の

ように防食された。

機械的除錆 清浄度 PSt2 1/2

- ・ 下塗り塗装

アミン硬化剤を用いたポリウレタン・タールクロム酸亜鉛化合物、膜厚 150 μm

ケーブルと支圧板およびシムプレートとの間の全隙間に、2成分から成る注入剤（ポリウレタンベ-

ス、イソシアナート硬化剤、硬化時間30分）を注入。支圧板上側とシムプレートおよびケーブルソケットの間の隙間はポリウレタン系パテで充填された。ソケット首部から注入パイプが装着され、支圧板からケーブル上側出口に排出パイプが据付られた。

同じような方法で、スプレーサドルの後ろの扇伏に広がったケーブル隙間も軸線間隔が 5 cm となる

部分まで充填された。この充填はテフロンを貼付された鋼製型枠を用いて行われた。型枠を取り外した後、表面には膜厚 50 μm の上塗り塗料が塗付された。

補修に先だって次の問題点に関する予備試験が行われた。

- ・ ケーブルへの塗料材料の付着性能を考慮した清浄度 PSt3 と PSt2 2/1 の適用性
- ・ 材料相互および旧塗装との付着性
- ・ パテの硬化時間、およびシムプレート（調整板）と支圧板に荷重が作用するまでのポリウレタン・タール化合物の必要な硬化時間の調査

さらに、塗装材料、パテおよび注入剤に対して、適正検査と品質検査が行われた。これ

らの材料の

特性値は、搬入状態でも、施工状態でも、さらに硬化状態においても管理された。

新しい塗料の決定は、次の理由によっている。

- ・ 活荷重と温度によりケーブルは永続的に変形を受け、硬化状態で弾性的な塗料が必要とされる。その結果、ポリウレタン・タール化合物が選択された。
- ・ 硬化剤構成成分として、アミン硬化剤が選択されたのは、スプレーサドル室の高い湿度に対して、普通のイソシアナート硬化剤よりも鈍感だからである。
- ・ 注入作業において、イソシアナート硬化剤を混合した低粘性のポリウレタン・クロム酸亜鉛樹脂が選択された。この硬化剤は狭い隙間部分に存在する水分を吸収し、二酸化炭素に変換することができる。

－ 7 今後の対策および反省点

①今後の対策および反省点

- ・ スプレーサドル室内の防食設計では、常に存在する室内の湿気を考慮しなければならない。
- ・ スtrandおよびケーブルのアプローチできない範囲はすべて、有効な防食システムで完全に充 すべきである。
- ・ スプレーサドル室への水の侵入は、表面水、地下水にかかわらず、構造的な処置により排除すべきである。

(5) セーヌ河 タンカービル橋 (仏：ルーアン市)

- 1 構造形式 : 連続補剛桁吊橋 (176+608+176=960m)
- 2 完成年度 : 1959
- 3 補修年度 : 1970頃 (カラー部)
1998 (主ケーブル)

- 4 損傷の内容

ケーブルのカラー部でワイヤーが少数であるが切断した。

上流側のケーブルが、左岸アンカレイジ入り口のデビエーターサドルの直前で破断した。

- 5 損傷の原因

主ケーブルに使用されていたストランドは、亜鉛メッキを施されていない鋼線を用い、表面を塗装しただけのものであったため腐食対策が万全でなかった。

カラーのところにケーブルを保護する目的で使った祖麻が、水を含み、カラー部分が湿潤な空間となったため、腐食が発生、進展した。

上流側のケーブルの破断箇所は、冬にはトラックによる塩分混じりの水しぶきにまともさらされる箇所であったため腐食が生じた。

- 6 補修・補強の方法

祖麻を取り除き、ケーブルはカラーのところで軽くサンドブラストして、部分的に腐食箇所を取り除き、亜鉛含有量の高いペンキで再度塗装するとともに、流電気の影響が少なくなるよう亜鉛板をケーブルとカラーの間に挿入した。

上流側ケーブルの破断については、応急対策として、切断したストランドの両側にソケットを取り付け、その間に新たにストランドを挿入して結合する方法で措置した。

張力は、ソケットの寸法で横方向にずれるので、小さな張力しか受け持てず終局強度を高めることが目的であった。

恒久対策は、既設のケーブルを90本のストランドからなるケーブルに置き換え、既設ケーブルのアンカーボルトに特殊な方法で定着させる方法とした。この方法は、アンカレイジの内部の煩雑さがなく、収納の寸法的な問題もなく、同時に定着具の大きさも小さくできることから採用となった。

ケーブルのアンカレイジへの定着は、アンカレイジ室の入り口でケーブルを偏向させるデビエーターを、既存のケーブルの両サイドに新しく設置した。これらは、通常ある限界まで動く構造が必要であったので、実際はテフロン張り付けのネオプレン板に設置し、これがステンレス板の上を滑る構造とした。

主塔の頭部は非常に限られたスペースしかないため、現在のサドルの両側から、鉄筋コンクリートで挟み込み、PC鋼棒でプレストレスを与え、新しいサドルはこのコンクリート上に据え付けることとした。

ー 7 今後の対策および反省点

- ・ 使用したケーブルは被覆無しの裸ケーブルに重層亜鉛メッキ並びに塗装を施したものがだったが Lock-coil 仕様とすべきだったと考えられている。

(6) Köhlbrand 橋 (独 : ルーアン市)

- 1 構造形式 : 3 径間斜張橋 (97.5+325+97.5=520m)
- 2 完成年度 : 1 9 7 4
- 3 補修年度 : 1 9 7 7 頃

- 4 損傷の内容

ケーブルとケーブルアンカー部に甚大な腐食が発生。

- 5 損傷の原因

施工不良のために生じたコーティングのヘアクラックからケーブルに水が浸透し、ロープ間の空隙を伝わって頂部から底部へ流れ込んだものと考えられ、その結果、ケーブル及びケーブルアンカー部に腐食による膨れ上がりが生じた。

また、冬季に路面の凍結防止剤として使用される塩化物を含んだ水が、交通車両によってアンカー部付近に跳ね飛ばされるのも一因である。

- 6 補修・補強の方法

素線を亜鉛メッキしたものに取り替える。

6. まとめ

これまでの、調査・実験結果から以下のことが判明している。

- ①ケーブルは、ケーブル内に水がない場合は、腐食しないが、水が存在する場合は、腐食が起こる。
- ②ケーブルを長期にわたり完全に遮水することは困難である。
- ③垂鉛めっき鋼線の場合、相対湿度が60%以下であれば腐食は防げる。

乾燥空気の送気による吊橋ケーブルの防食方法は、世界でも初めての試みであるが、今後もその効果をモニタリングしていく必要がある。また、将来の展望として新素材を用いた錆びない高強度のケーブル、例えば炭素繊維を用いたケーブルの開発が期待されている。

7. 参考文献

1. R&D神戸製鋼技報 Vol.49 No.2、1999年9月
2. 三田村ほか：橋梁用ケーブルの最近の話題と展望
土木学会論文集 No.444/VI-16、1992年3月、p.97
3. 保田、鈴木、木村：吊橋ケーブルの防食方法の検討
本四技報 Vol.16 No.61、1992年1月
4. 古家：送気乾燥による吊橋ケーブル防食試験
本四技報 Vol.21 No.84、1997年10月
5. 佐伯、河藤：送気による吊橋ケーブルの防食
土木学会誌 Vol.83、1998年1月
6. 佐伯、古家：吊橋ケーブルの防食方法
土木施工、1997年7月
7. 高田ほか：白鳥大橋ケーブル防食工事について
土木学会 北海道支部、1997年
8. 平野：ケーブル一般部の新防食工法
橋梁と基礎、1999年5月
9. R.ルールベルク（監訳：山崎、成井）：
「ドイツ連邦交通省道路建設局 道路橋の補修・補強事例集 報告書1990」
土木施工臨時増刊、1995年4月